

Dispositif expérimental pour la mesure de propriétés élastiques et cohésives à l'échelle de l'interface ciment-granulat

J. Lhonneur^{1,2,3},

¹ IRSN, B.P.3, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance Cédex, France. {joffrey.lhonneur}@irsn.fr

² LMGC, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France.

³ MIST Lab, IRSN, CNRS, Université de Montpellier, France.

RÉSUMÉ

La rupture d'un béton est grandement conditionnée par la qualité des propriétés de cohésion de la zone de transition interfaciale entre matrice cimentaire et granulats. La caractérisation expérimentale quantitative de ces propriétés reste une question très ouverte au sein de la communauté scientifique.

Dans cette étude, nous présentons un dispositif expérimental innovant de flexion trois points permettant l'acquisition, à l'échelle locale de l'interface pâte de ciment/granulat, de la réponse mécanique des phases en présence et de la vitesse de propagation de fissure en surface de l'éprouvette testée.

Les résultats obtenus ont vocation à être utilisés pour l'identification de paramètres de modèles de rupture quasi-fragile basés sur des approches élastiques-cohésives.

Mots-clés

Identification, Rupture, Interface, Propriétés cohésives locales.

I. INTRODUCTION

La zone de transition interfaciale entre la pâte de ciment et les granulats d'un béton joue un rôle prépondérant dans les mécanismes de rupture des matériaux cimentaires (Šimonová et al, 2017 ; Samal et al, 2019). Des recherches expérimentales récentes ont été menées pour caractériser le comportement mécanique de cette zone de transition (Mielniczuk et al, 2015 ; Jebli et al, 2018) et bien que des tentatives d'identification des paramètres de zones cohésives associés aient été effectuées (Malachanne et al, 2018 ; Salah et al, 2019), la question d'une identification systématique de ces paramètres demeure encore ouverte.

Dans cette étude, nous présentons un dispositif expérimental innovant pour la mesure de paramètres mécaniques d'une pâte de ciment et de la zone interfaciale à l'échelle de l'interface pâte de ciment/granulat, échelle dite locale. L'essai présenté est un essai de flexion trois points sur des éprouvettes parallélépipédiques de section carrée de 10 mm de côté et 30 mm de longueur. Deux types d'éprouvettes sont investiguées : des éprouvettes entaillées de pâte de ciment homogène et des éprouvettes composites pâte de ciment / granulats siliceux.

La géométrie des éprouvettes induit l'apparition d'une unique fissure au cours de l'essai de flexion trois points. L'acquisition de la réponse mécanique de l'essai de flexion est couplée à une acquisition par caméra haute résolution d'une face de l'éprouvette et à une mesure de la vitesse de propagation de la fissure en surface des éprouvettes. L'acquisition vidéo de la caméra permet d'accéder par corrélation d'images au champ des déplacements et des déformations en surface des éprouvettes.

II. Matériaux et méthodes

A. Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes de ciment entaillées ainsi que les éprouvettes composites ciment/granulats siliceux utilisées lors des essais de flexion trois points à l'échelle locale sont décrites sur la Figure 1.

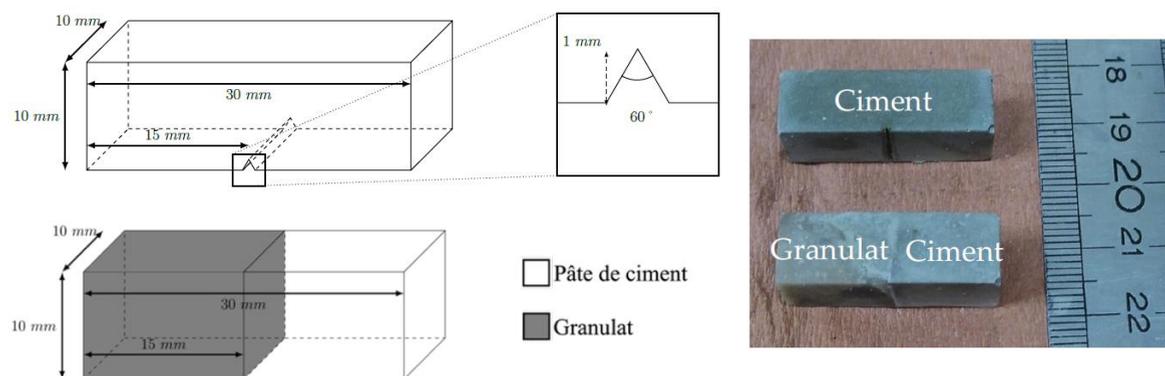


FIGURE 1. En haut, à gauche : géométrie des éprouvettes de ciment entaillées. En bas, à gauche : description d'une éprouvette composite. À droite : photo des deux types éprouvettes.

Le ciment utilisé est un CEM I 52,5 R, avec un rapport eau/ciment de 0,5. Les granulats siliceux sont découpés selon le protocole proposé par Jebli et al, 2018. Les éprouvettes sont coulées horizontalement dans un moule en silicone (contenant la pré-entaille pour les éprouvettes de pâte de ciment) qui est ensuite placé dans un environnement à humidité relative élevée (> 90%) pendant un jour. Elles sont ensuite extraites des moules et plongées dans de l'eau distillée saturée en chaux à température ambiante pendant 28 jours (la chaux permet l'obtention d'une solution tampon de pH égal à 12. Ceci permet de limiter la lixiviation durant la phase de conservation (Jebli et al, 2018).

Afin de permettre un post-traitement de l'acquisition vidéo par l'utilisation de techniques de corrélation d'images numériques (Li et al, 2015) un mouchetis est appliqué sur l'une des faces des éprouvettes à l'aide d'une peinture à effet métallisé.

B. Présentation du banc d'essai

Un dispositif de flexion trois points à l'échelle centimétrique (Figure 2 à gauche) est couplé à une machine de compression (MTS) équipée d'un capteur de force de 500 N et d'un capteur de déplacement de traverse. Le chargement quasistatique est appliqué via des liaisons de type linéique (Figure 2, à droite).

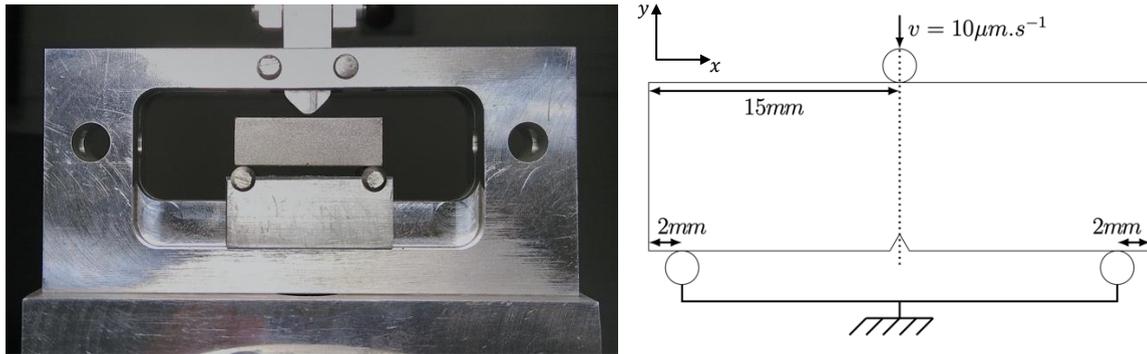


FIGURE 2. À gauche : photo du dispositif de flexion trois points. À droite : description du chargement de flexion trois points.

C. Mesure de la vitesse de propagation d'une fissure en surface d'une éprouvette

Une série de bandes parallèles de peinture noire conductrice d'électricité reliant deux bornes réalisées à partir d'un ruban adhésif conducteur sont réalisées dans le sens de la longueur des éprouvettes, orthogonal à la trajectoire de fissuration pressentie (Figure 3 à gauche). Ces bandes de peinture ont une épaisseur de 0,5 mm et sont régulièrement espacées de 1 mm. Un tel motif de peinture a été rendu possible par l'utilisation d'un autocollant fait sur mesure à l'aide d'une imprimante à autocollant « silhouette cameo 3 ». Ces bandes sont destinées à la mesure de propagation de fissure par réduction de conductivité électrique entre les deux bornes conductrices des éprouvettes.

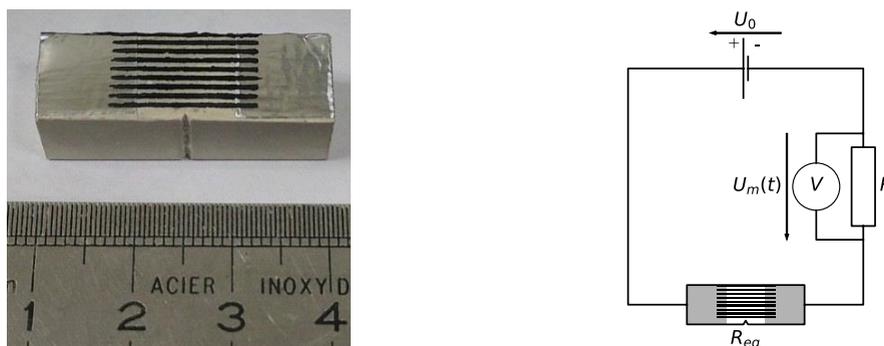


FIGURE 3. À gauche : photo montrant une éprouvette dotée de deux bornes conductrices d'électricité reliées par des bandes de peinture conductrice. À droite : schéma du montage électrique pour la mesure de la vitesse de propagation d'une fissure en surface d'une éprouvette.

À l'aide d'un oscilloscope numérique « Digilent Analog Discovery 2 », l'éprouvette est branchée sur un circuit électrique alimenté par une tension continue $U_0 = 5 \text{ V}$. La tension $U_m(t)$ à l'instant t aux bornes d'une résistance R , branchée en série avec l'éprouvette, est mesurée avec une fréquence

d'acquisition de 1 MHz (cf Figure 3 à droite). La loi d'Ohm implique que cette tension $U_m(t)$ soit proportionnelle à l'intensité de courant $I(t)$ traversant le circuit $U_m(t) = R I(t)$. La résistance équivalente entre les deux bornes conductrices est notée R_{eq} . L'égalité des courants électriques traversant les résistances R et R_{eq} (montées en série) et l'utilisation de la loi d'Ohm aux bornes de R_{eq} donnent alors la relation suivante :

$$R_{eq}(t) = R \frac{U_0 - U_m(t)}{U_m(t)}$$

où la résistivité du ruban adhésif est négligée.

La fissure rompt progressivement les bandes de peinture faisant ainsi varier R_{eq} (figure 4).

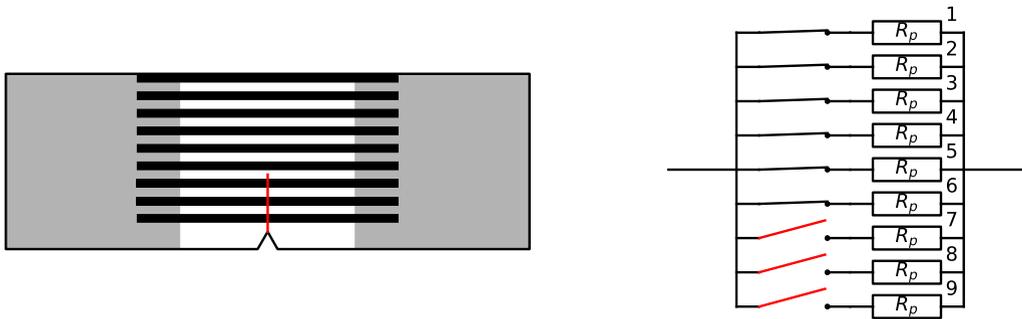


FIGURE 4. À gauche : illustration de la coupure de trois bandes de peinture par une fissure (en rouge) sur une éprouvette de ciment. À droite : représentation de la coupure des bandes de peinture, de résistance électrique R_p , par le passage de la fissure.

La résistance électrique équivalente de l'éprouvette est donnée par :

$$R_{eq}(t) = \frac{R_p}{n(t)}$$

où R_p est la résistance électrique d'une unique bande de peinture et $n(t)$ le nombre de bandes de peinture non coupées à l'instant t . Les deux relations précédentes permettent d'estimer le nombre de bandes de peinture rompues par la pointe de fissure. Les bandes de peinture étant régulièrement espacées, ce nombre de bandes rompues est proportionnel à la longueur de la fissure. Une relation continue est obtenue en remplaçant le nombre de bandes de peinture coupées par la hauteur de la pointe de fissure $h(t)$ et le nombre total de bandes par la distance finale h_0 de parcours de la fissure de la première à la dernière bande de peinture :

$$h(t) = h_0 \left(1 - \left(\frac{U_0}{U_m(0)} - 1 \right) \left(\frac{U_m(t)}{U_0 - U_m(t)} \right) \right)$$

Le signal h s'apparente à un signal par morceaux et la valeur $h(t)$ calculée à l'instant t est une estimation par valeur inférieure de la hauteur de la pointe de fissure à l'instant t (voir la courbe bleue sur la figure 7, à gauche). La longueur réelle de la fissure est estimée en considérant l'enveloppe supérieure du signal h (voir la courbe verte sur la figure 7, à gauche). La vitesse de propagation de la fissure est calculée à partir de l'évolution temporelle de cette longueur de fissure.

À notre connaissance, deux dispositifs de mesure de propagation de fissures en surface de matériaux par perturbation d'un signal électrique ont déjà été proposés dans la littérature (Bowler, 2006 ; Lisowski, 2012). Cependant, ces méthodes ne sont pas adaptées à l'étude d'une propagation de fissure bords à bords d'une surface d'un matériau isolant. Pour autant que nous le sachions, le dispositif que nous présentons ici est donc une innovation.

D. Méthode de corrélation d'images numériques intégrée

Une caméra haute résolution « SVS-VISTEK HR Dual GigE, hr16070MFLGEC » permet la mesure du champ des déplacements en surface des éprouvettes via une méthode de corrélation d'images numériques intégrée (Leclerc et al, 2009). Dans le cas de la flexion trois points, on montre que dans une zone suffisamment éloignée des conditions aux limites, le champ des déplacements \bar{U} est de la forme suivante :

$$\bar{U}(\bar{X}) = \bar{X}_0 + \bar{R}(\theta)(\alpha \bar{U}_K(\bar{X}) + \beta \bar{U}_\mu(\bar{X}) + \bar{X} - \bar{X}_0) + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} - \bar{X}$$

où \bar{X}_0 est le point autour duquel est calculée la rotation de corps rigide d'angle θ , t_x et t_y les composantes d'une translation de corps rigides et \bar{U}_K et \bar{U}_μ des champs de déplacements indépendants des modules d'élasticité du matériau. Les valeurs des cinq paramètres θ , t_x , t_y , α et β sont obtenues par minimisation de l'erreur de corrélation (Leclerc et al 2009).

III. Résultats

Les résultats présentés portent sur 21 essais de flexion réalisés sur des éprouvettes homogènes de pâte de ciment entaillées. Des résultats équivalents dans le cas des composites pâte de ciment / granulat seront présentés ultérieurement.

A. Courbes de réponse et faciès de rupture

La Figure 5 montre les courbes de réponses mécaniques obtenues pour ces essais (à gauche) ainsi que les faciès de rupture de trois éprouvettes (à droite).

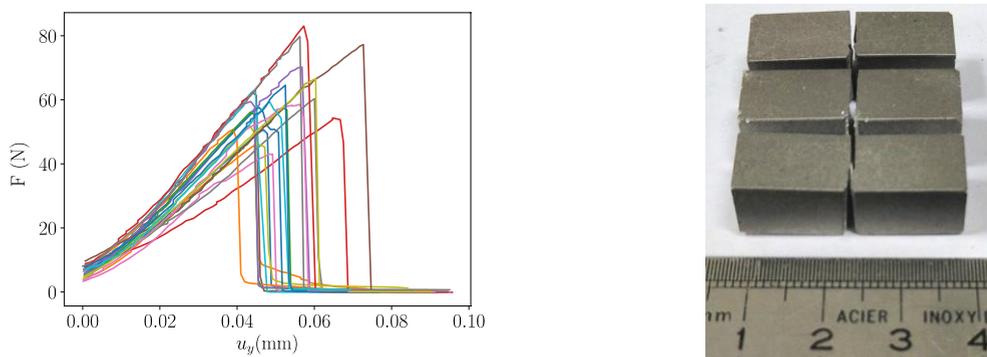


FIGURE 5. À gauche : courbes de réponses force-déplacement de 21 essais. À droite : faciès de rupture de trois éprouvettes (côté mouchetis).

Bien que les faciès de rupture semblent relativement reproductibles, une dispersion des réponses mécaniques en raideur effective, en force et en allongement à rupture est observée. Cette dispersion peut notamment être imputée à :

- une échelle d'étude inférieure à l'échelle représentative des comportements effectifs ;
- une variabilité des conditions aux limites réellement imposées durant les essais ;
- une variabilité de la microstructure de la pâte de ciment entre les éprouvettes.

B. Champ des déplacements en surface des éprouvettes

La Figure 5 montre le mouchetis d'une éprouvette de ciment à plusieurs échelles (à gauche de la figure), la région d'intérêt sur laquelle la corrélation d'images est menée, ainsi que l'histogramme des niveaux de gris sur cette région (à droite de la figure).

La Figure 6 montre la composante horizontale (à gauche) et verticale (à droite) du champ des déformations obtenu pour un chargement de 75 N sur une éprouvette de pâte de ciment entaillée.

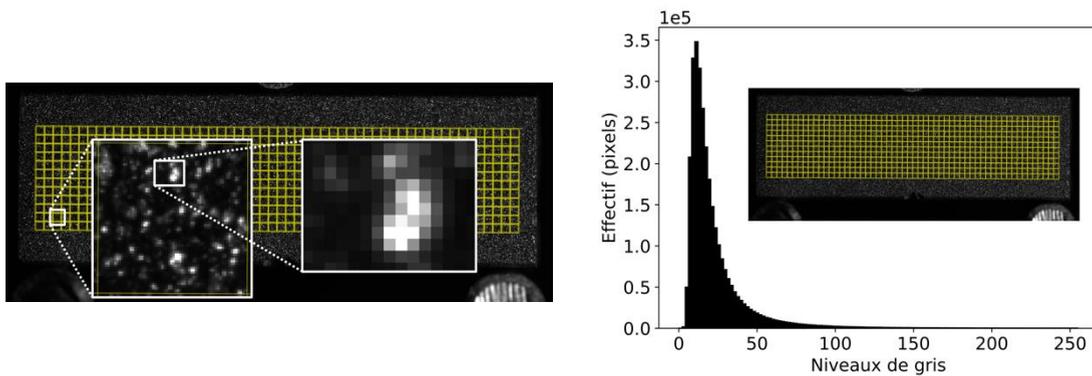


FIGURE 5. À gauche : aperçu multi-échelle du mouchetis utilisé et de la région d'intérêt (grille jaune). À droite : histogramme des niveaux de gris dans la région d'intérêt.

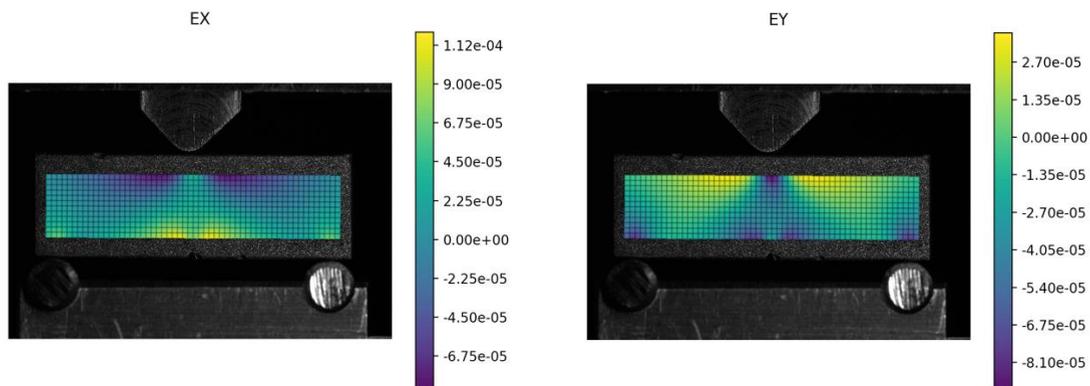


FIGURE 6. Champ des déformations en surface d'une éprouvette pour un chargement de 75 N. À gauche : composante horizontale. À droite : composante verticale.

Une méthode d'identification des modules d'élasticité, non détaillée ici, sur la donnée du champ des déformations en surface des éprouvettes, associé à un chargement donné, a été développée. À la différence de certaines méthodes d'identification rencontrées dans la littérature (Leclerc et al,

2009), celle-ci ne nécessite pas le recours à une hypothèse de cinématique plane. Une étude complémentaire est nécessaire pour quantifier la précision d'une telle identification.

C. Vitesse de propagation de fissures

La vitesse de propagation des fissures en surface des éprouvettes a été extraite des signaux électriques mesurés à l'aide de l'oscilloscope numérique, dont un exemple est donné sur la Figure 7 à gauche (courbe rouge). Un exemple d'évolution temporelle de la vitesse de propagation de fissure est fourni sur la Figure 7 à droite.

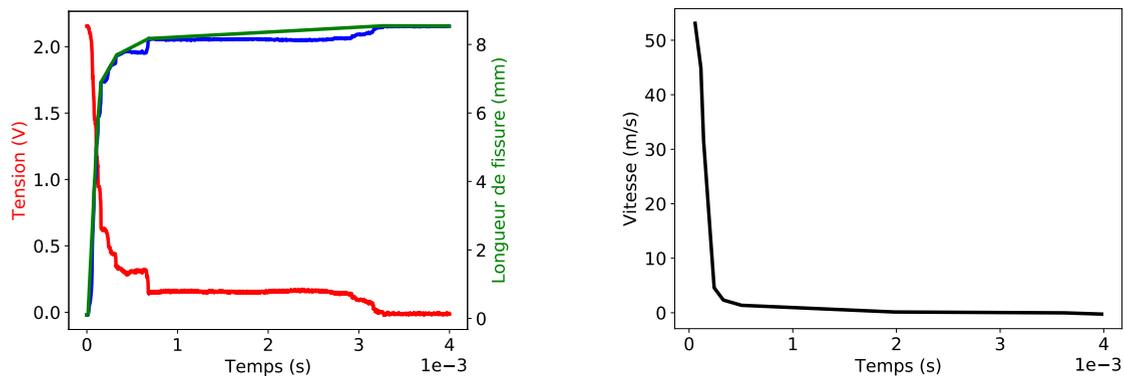


FIGURE 7. À gauche : exemple d'un signal mesuré à l'oscilloscope (courbe rouge), longueur de fissure correspondante estimée (courbe bleue) et son enveloppe par valeur supérieure (courbe verte). À droite : vitesse de propagation de la fissure estimée en fonction du temps.

L'utilisation d'une caméra rapide pour mesurer la vitesse de propagation d'une fissure dans une pâte de ciment lors d'un essai de traction à l'échelle locale avait été proposée par Mielniczuk et al, 2015. Des valeurs de vitesses de propagation de l'ordre de 180 m/s avaient alors été obtenues. Soit plus de trois fois supérieures à celles présentées sur la figure 7, à droite.

Une partie de cet écart peut s'expliquer par le fait que le ciment utilisé par Mielniczuk et al, 2015, n'est pas le même que celui utilisé dans ces travaux. Une seconde explication, de nature géométrique, expliquerait mieux un si grand écart. Dans les expériences de Mielniczuk et al, 2015, la fissure arrive « par-dessous » la surface de l'éprouvette qui est observée, la direction de propagation de la fissure n'est pas contenue dans le plan d'observation. Ainsi, ce n'est vraisemblablement pas la vitesse de propagation de la fissure qui est mesurée mais la vitesse d'apparition d'une fissure en surface d'une éprouvette. Cette vitesse est nécessairement plus grande que la vitesse de propagation de la fissure. Dans l'essai de flexion, la fissure se propageant selon une direction comprise dans le plan d'observation de la fissuration (selon la direction de chargement), la vitesse d'apparition de la fissure en surface des éprouvettes coïncide avec la vitesse de propagation de cette fissure. Il semble donc normal d'obtenir ici une vitesse moyenne moins élevée que celle obtenue par Mielniczuk et al, 2015.

IV. Conclusion

Un dispositif expérimental innovant a été conçu et réalisé dans le but de caractériser le comportement à la rupture d'un béton à l'échelle de l'interface pâte de ciment/granulat. Ce

dispositif est couplé à un outil de mesure de la vitesse de propagation de fissure en surface d'une éprouvette, également mis au point pour les besoins de cette caractérisation.

L'imagerie, associée aux réponses mécaniques des essais de flexion, permettra l'identification de paramètres élastiques des éprouvettes (non détaillée ici). Cette mesure couplée à l'estimation de la vitesse de propagation des fissures et des forces maximales à rupture conduira à l'identification de paramètres cohésifs locaux. Des échantillons composites sont actuellement réalisés et seront testés sous peu. Le protocole expérimental développé peut être transposé à de nombreux autres matériaux fragiles et interfaces fragiles.

REFERENCES

H. Šimonová, B. Vyhlídal, B. Kucharczyková, P. Bayer, & Z. Keršner. (2017). Modelling of interfacial transition zone effect on resistance to crack propagation in fine-grained cement-based composites. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 41, 211-219.

D.K. Samal, S. Ray, & T. Hemalatha. (2019). Effect of interfacial transition zone on fracture energy in concrete. *10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-X*.

B. Mielniczuk, M. Jebli, F. Jamin, M.S. El Yousoufi, C. Péliou, & Y. Monerie. (2015). Characterization of behavior and cracking of a cement paste confined between spherical aggregate particles. *Cement and Concrete Research*, 79, 235-242.

M. Jebli, F. Jamin, E. Malachanne, E. Garcia-Diaz, & M.S. El Yousoufi. (2018). Experimental characterization of mechanical properties of the cement-paste aggregate interface in concrete. *Construction and Building Materials*, 161, 16-25.

E. Malachanne, M. Jebli, F. Jamin, E. Garcia-Diaz, & M.S. El Yousoufi. (2018). A cohesive zone model for the characterization of adhesion between cement paste and aggregates. *Construction and Building Materials*, 193, 64-71.

N. Salah et al. (2019). Identification of a cohesive zone model for cement paste-aggregate interface in a shear test. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 1-15.

L. Li, J.M. Muracciole, L. Waltz, L. Sabatier, & B. Watrisse. (2015). Local investigations of thermo-mechanical behavior of a coarse-grained aluminium multicrystal using constrained DIC and IRT methods. *Optics and Lasers in Engineering*, 81, 1-10.

N. Bowler. (2006). Theory of Four-Point Direct-Current Potential Drop Measurements on a Metal Plate. *Research in Nondestructive Evaluation*, 17, 29-48.

M. Lisowski. (2012). Wireless Passive Sensor for Crack Detection Exploiting RFID Technology. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 12, 92-99.

M. Leclerc, J.N. Périé, F. Hild, & S. Roux. (2009). Corrélation d'Images Numériques Intégrée pour l'identification de propriétés mécaniques. *19^{ième} Congrès Français de Mécanique, Marseille*.